بسم الله الرحمن الرحیم

بخش سوم

ابزار اندازه گیری و کنترل
ترم دوم سال تحصیلی ۹۷-۹۶

محمد مزیدی
Mazidi.blog.ir
Mohammad.mazidi@iran.ir

نیرو سنج

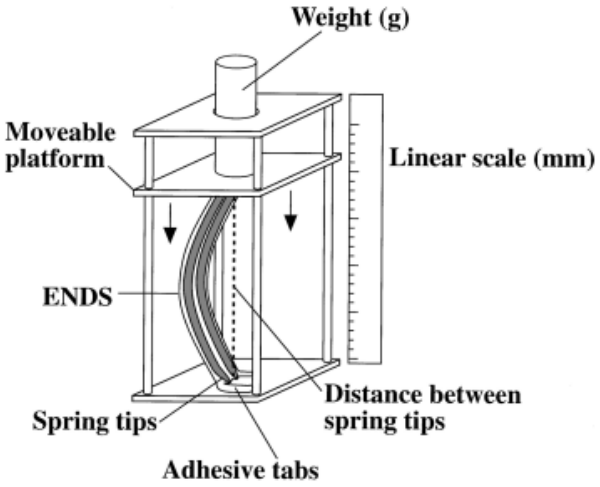
- کاربرد اندازه گیری نیرو
  - مستقیم (اندازه گیری نیرو)
  - اندازه گیری فشار (P=F/A)
  - اندازه گیری شتاب (a=F/m)
  - اندازه گیری جابجایی

- نیروسنج ها
  - ابزار الاستیک
  - کرنش سنج ها
  - کریستال های پیزوالکتریک
  - فشارسنج ها

نیروسنج

❖ ابزار الاستیک

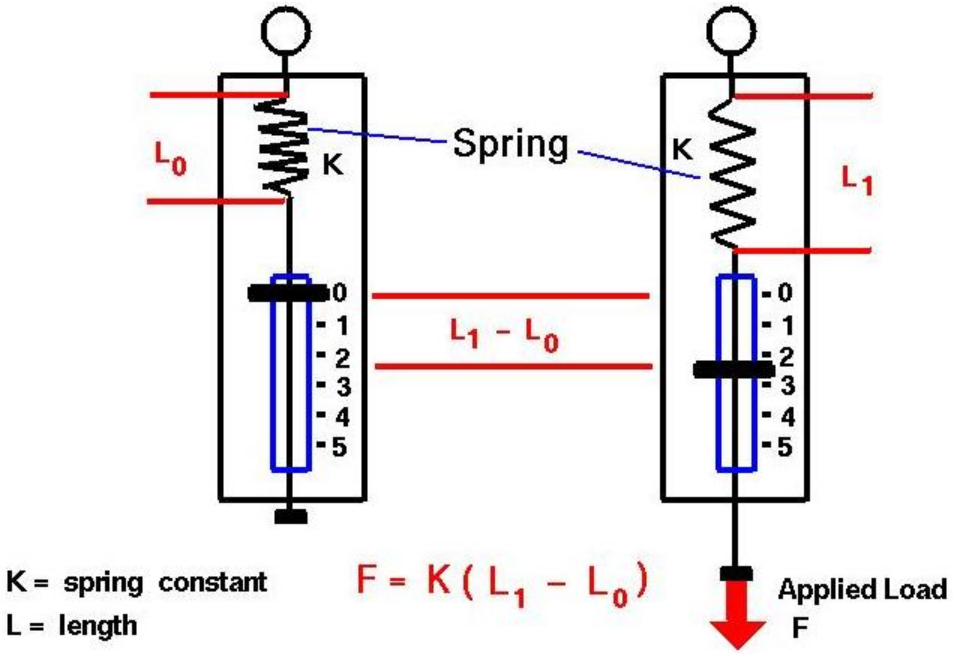
- قطعهٔ الاستیک با توجه به مشخصات نیروی وارده تغییر شکل می‌دهد.
- برای محاسبه نیرو، با استفاده از تست هایی که از قبل انجام شده است بین نیرو و تغییرشکل رابطه ای بدست آمده است. درنتیجه کافی است مقدار تغییر شکل محاسبه شود.



- در این روش اندازه‌گیری، رعایتِ دو شرط اساسی ضرورت دارد:
  - داشتن یک رابطهٔ خطی بین نیروی وارده و میزان تغییر شکل جسم الاستیک
  - حساس نبودن دستگاه نسبت به نیروهائی که به طور مستقیم در جهت اکسلهای اصلی (x, y, z) وارد نمی‌شوند.

❖ ابزار الاستیک

- استفاده از فنر و معادله تغییر شکل فنر

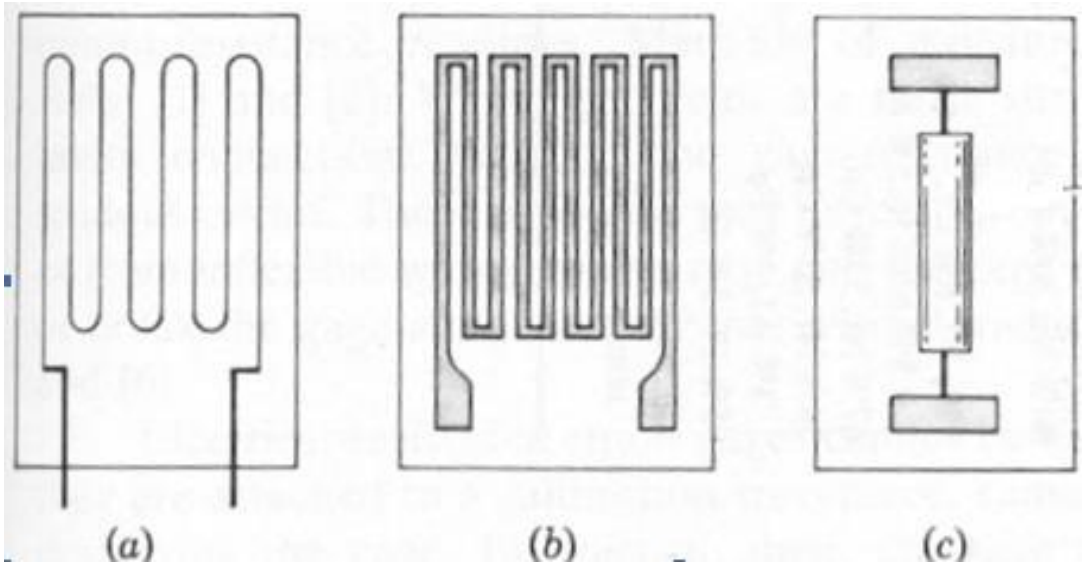


- مشکل احتمالی ابزار الاستیک: بعد از مدتی جسم الاستیک خاصیت خود را از دست بدهد.
- گسترهٔ کاری ترانسدیوسرها با روش فوق محدود بوده و تا ۲۵ کیلو نیوتن است.
- روش دقیق تر که مشکل این روش را نداشته باشد استفاده از کرنش سنج ها می باشد.

نیروسنج

❖ کرنش سنج

- این ادوات قادرند در گسترهٔ خیلی وسیعتری ($0 - 3x10^6$ kN) نسبت به ابزار الاستیک کار کنند.

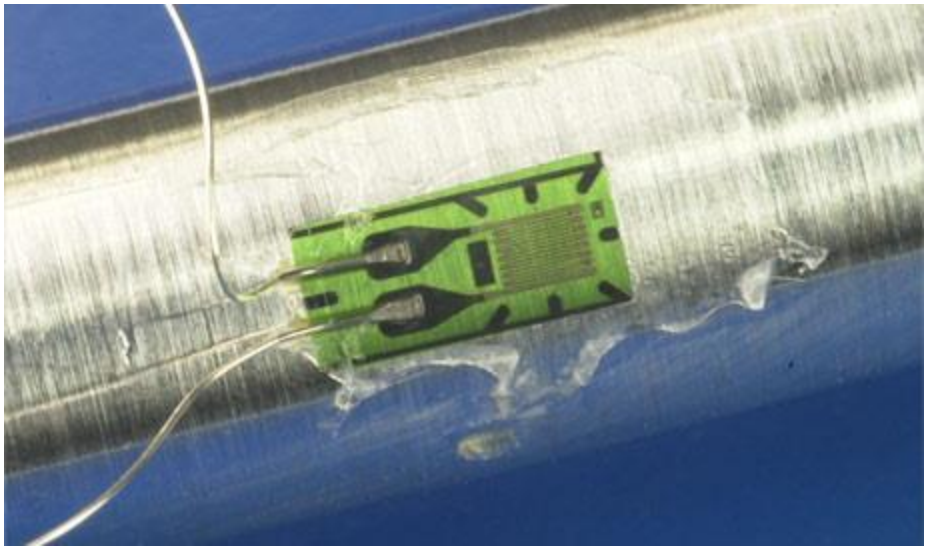


- انواع کرنش سنج
  - کرنش‌سنج سیمی (a)
  - کرنش‌سنج صفحه‌ای (b)
  - کرنش‌سنج نیمه هادی (c)
- نوع سیمی و صفحه‌ای، متداول‌ترین کرنش‌سنج ها در اندازه‌گیری‌های مختلف به شمار می‌آیند.
- کرنش‌سنج نیمه‌هادی بر مبنای اثر پیزوالکتریک بعضی از نیم‌هادی‌ها مثل سیلیکون و جرمانیوم ساخته شده‌است.

نیروسنج

❖ نحوه استفاده از کرنش سنج ها

- کرنش سنج ها ابزار بسیار ظریف و حساسی هستند که می بایست با دقت بر روی جسمی که تحت تنش یا نیرو قرار می گیرند نصب شوند.
- اعمال تنش یا نیرو به جسم



نیروسنج

❖ کرنش سنج

- شناسهٔ الکتریکی که متناسب با کرنشِ ایجاد شده تغییر می‌یابد، مقاومت الکتریکی باشد: $R = \rho \frac{l}{A}$

R: مقاومت سیم

L: طول سیم

A: سطح مقطع سیم

ρ: مقاومت ویژه سیم

- ارتباط بین تغییر طول و تغییر مقاومت با **فاکتور کرنش** سنج برقرار می شود.

❖ فاکتور کرنش‌سنج (Gage Factor)

- نسبت تغییرات مقاومت نسبت به تغییرات کرنش وارده را فاکتور کرنش‌سنج می‌نامند: $S_g = \frac{\Delta R / R}{\Delta L / L}$
- فاکتور کرنش‌سنج یک کمیت بدون بعد است و هر قدر این کمیت بیشتر باشد نشانگر حساس‌تر بودن دستگاه می‌باشد.

نیروسنج

- مثال: کرنش‌سنجی به یک میلهٔ فولادی به طول ۱۰ سانتی‌متر و سطح مقطع ۴ سانتی‌متر مربع بسته شده‌است. مدول الاستیسیتهٔ فولاد (20.7×10^{10} N/m^2) است. کرنش‌سنج دارای مقاومت الکتریکی اسمی ۲۴۰ اهم بوده و $S_g = 2.2$ می‌باشد. وقتی این میله تحت بار قرار گرفت مقاومت الکتریکی کرنش‌سنج به اندازهٔ ۰/۰۱۳ اهم تغییر یافت. تغییر طول میلهٔ فولادی و مقدار نیروی وارده بر آن را حساب کنید.

$$\frac{\Delta R}{R} = S_g\left(\frac{\Delta L}{L}\right) \Rightarrow \Delta L = \frac{\Delta R}{R} \times \frac{L}{S_g} = \frac{0.013}{240} \times \frac{0.1}{2.2} = 2.46x10^{-6}$$

$$\sigma = E \times \varepsilon \begin{cases} \sigma = \dfrac{F}{A} \\ \varepsilon = \dfrac{\Delta L}{L} \end{cases} \Rightarrow \frac{F}{A} = E\frac{\Delta L}{L} \rightarrow F = E\frac{\Delta L}{L}A \Rightarrow F = 20.7 \times 10^{10} \times \frac{2.46 \times 10^{-6}}{0.1} \times 4 \times 10^{-4}$$

$$= 2.037 \times 10^{3}(N)$$

نیروسنج

- حالت ایده ال کرنش سنج: تغییرات مقاومت الکتریکی ایجاد شده در کرنش‌سنج‌ها همگی در نتیجهٔ تنش باشند. ولی در عمل مقاومت و حساسیت کرنش‌سنج نسبت به درجه حرارت تغییر می‌کند.

- مقاومت الکتریکی یک هادی در درجه حرارت جدید (T) از رابطهٔ زیر بدست می‌آید: $R_T = R_{To}(1+\alpha_o \Delta T)$
- در رابطهٔ فوق، R_T مقاومت الکتریکی هادی در درجه حرارت T، R_{TO} مقاومت الکتریکی در درجه حرارت شاخص، α_o ضریب دمائی جسم هادی، ΔT تغییر در درجه حرارت از T_O .
- تغییر مقاومت : $\Delta R = \alpha_o \Delta T R_{TO}$

- مثال: در مثال قبلی، تغییر مقاومت الکتریکی کرنش‌سنج را که با تغییر درجه حرارت به اندازهٔ ۱ درجهٔ سلسیوس ایجاد می‌شود حساب کنید. ضریب دمائی برای اکثر فلزات: $\alpha_o = 0.003925/°C$

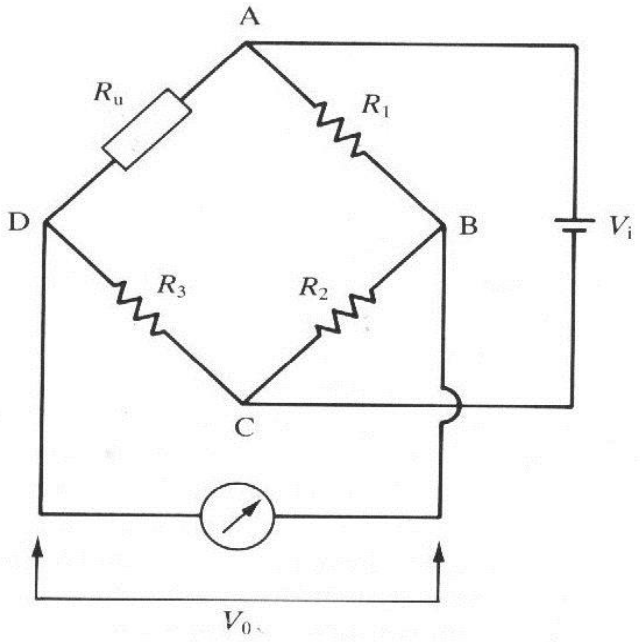
$$\Delta R = \alpha_o \Delta_T R_{TO}$$
$$\Delta R = (0.003925/°C)\ (1\ °C)(240) = 0.942$$

- با مقایسه نتیجه تغییر مقاومت ناشی از تنش در مثال قبل (۰/۰۱۳) با نتیجه این مثال **(۰/۹۴۲)** می بایست برای جبران اثرات دما چاره ای اندیشید.

نیروسنج

❖ پل وتسون

- ازانجاییکه مقادیر تغییرات خروجی کرنش سنج بسیار کوچک می باشد نیاز به روشی برای تقویت خروجی می باشیم. پل وتسون یک روش پرکابرد در کرنش سنج ها می باشد که علاوه بر تقویت خروجی می تواند اثرات دما را نیز خنثی نماید.
- مقاومت R_1، R_2 و R_3 ، دارای مقدار معلوم و ثابت
- مقاومت چهارم (R_u) یک مقاومت مجهول است.
- اگر به جای Ru از یک کرنش سنج استفاده شود، با تغییر کرنش ولتاژ خروجی تغییر می کند.



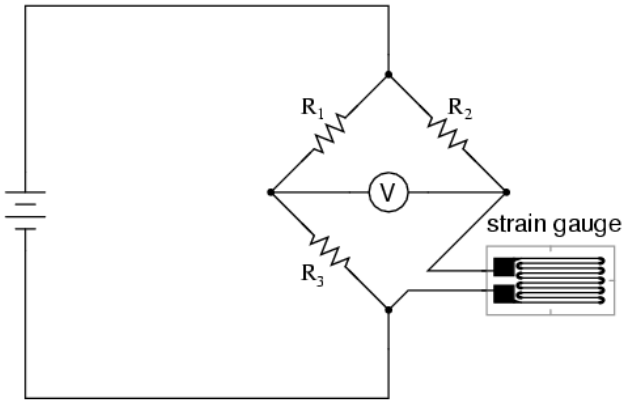
$$V_o = V_i\left(\frac{R_u}{R_u + R_3} - \frac{R_1}{R_1 + R_2}\right)$$

- می توان به جای مقاومت های دیگر هم از کرنش سنج استفاده کرد.

نیروسنج

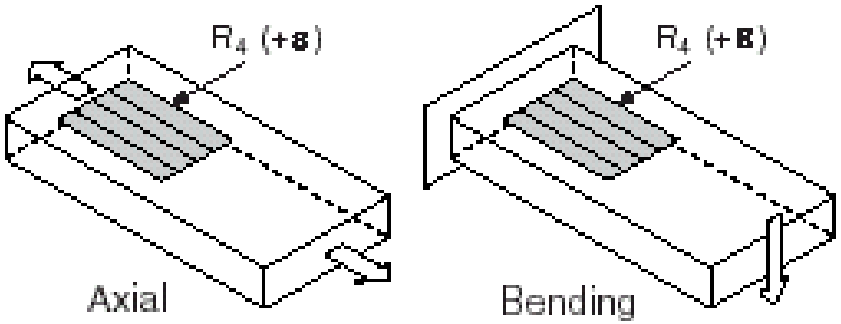
- آرایش های مختلف کرنش سنج در پل وتسون
  - ربع پل نوع ۱
  - ربع پل نوع ۲
  - نیم پل
  - پل کامل نوع

نیروسنج



❖ ربع پل نوع ۱

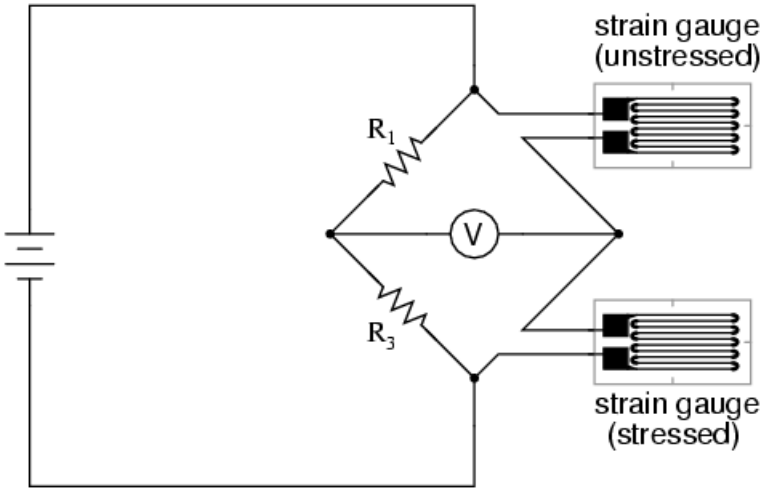
- از یک کرنش سنج تنها استفاده می شود.
- کرنش محوری و خمشی را می تواند محاسبه کند.
- تغییرات دما منجر به کاهش دقت آن می شود.

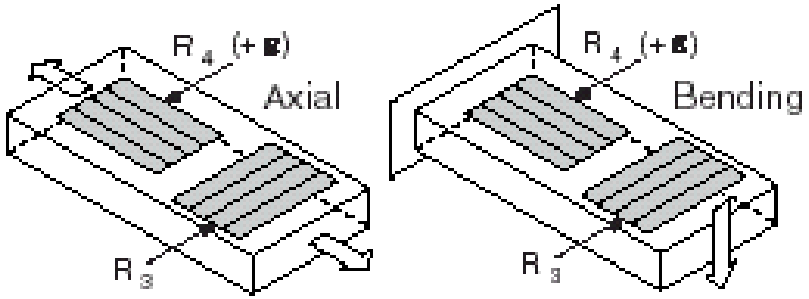


نیروسنج

❖ ربع پل نوع ۲

- یک کرنش سنج فعال (در جهت تنش و خمش)
- یک کرنش سنج غیرفعال (تنشی به آن اعمال نمی شود) برای جبران تغییرات دما
- غیرفعال در نزدیکی فعال نصب می شود تا تغییرات دمایی برابر داشته باشند.

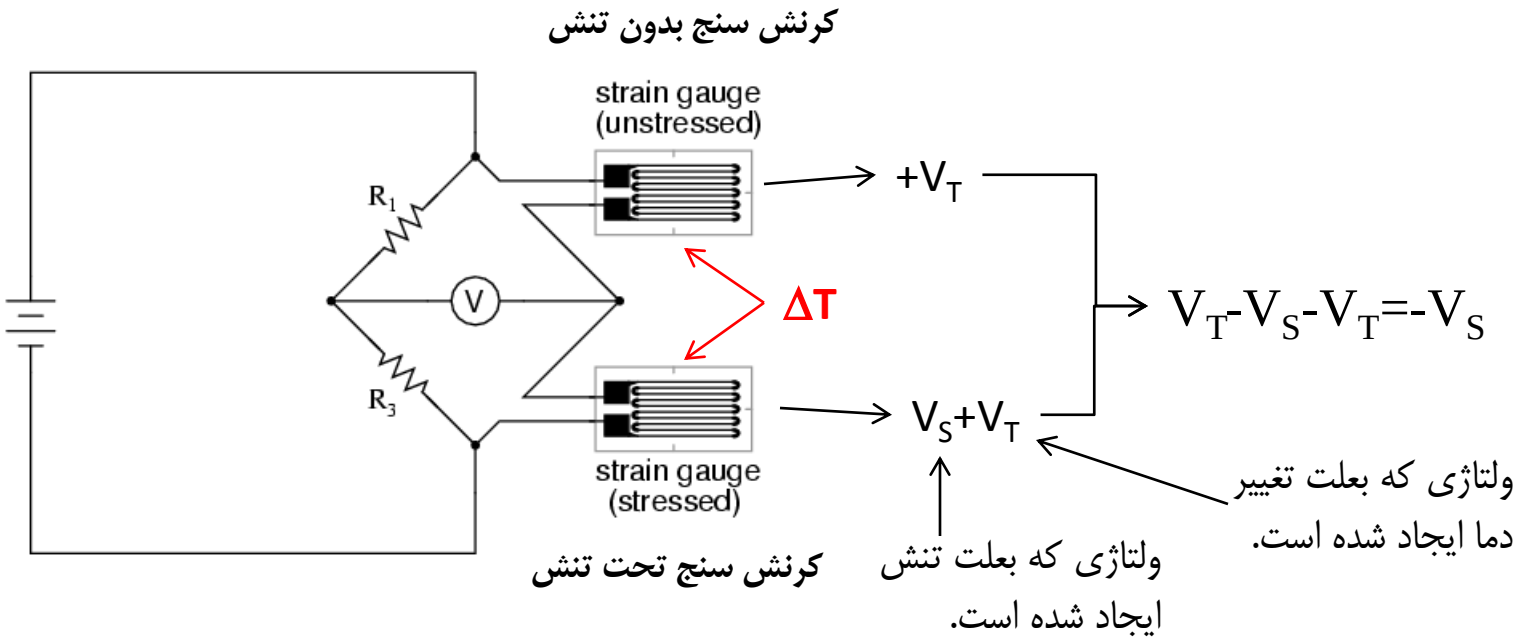




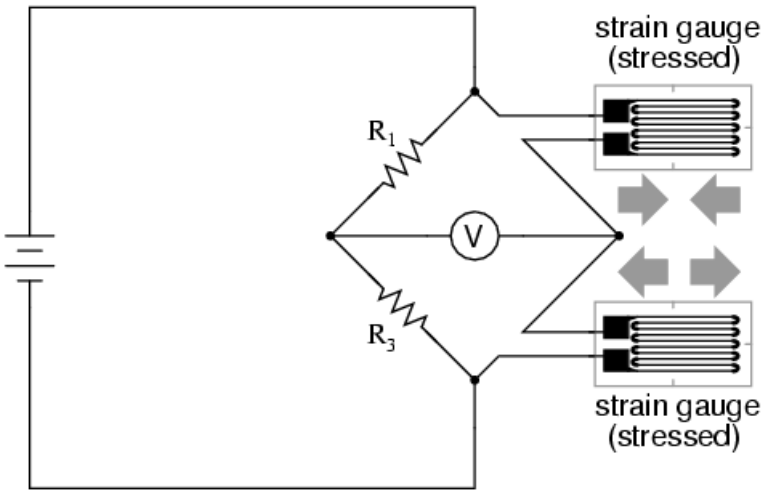
نیروسنج

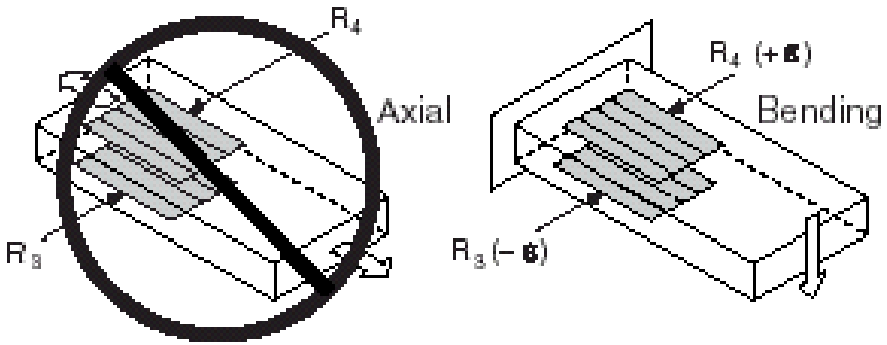
❖ روش جبران دمایی در پل وتسون

- براساس اصول حاکم بر پل وتسون تغییر ولتاژ در مدار بالای پل وتسون از تغییر ولتاژ مدار پایین کسر می شود.
- درنتیجه اگر یک کرنش سنج در مدار بالا در معرض تغییر دما قرار بگیرد و کرنش سنج پایین هم در معرض همان دما قرار بگیرند منجر به خنثی کردن همدیگر می شود. چون هر دو یک ولتاژ تولید می کنند.



نیروسنج



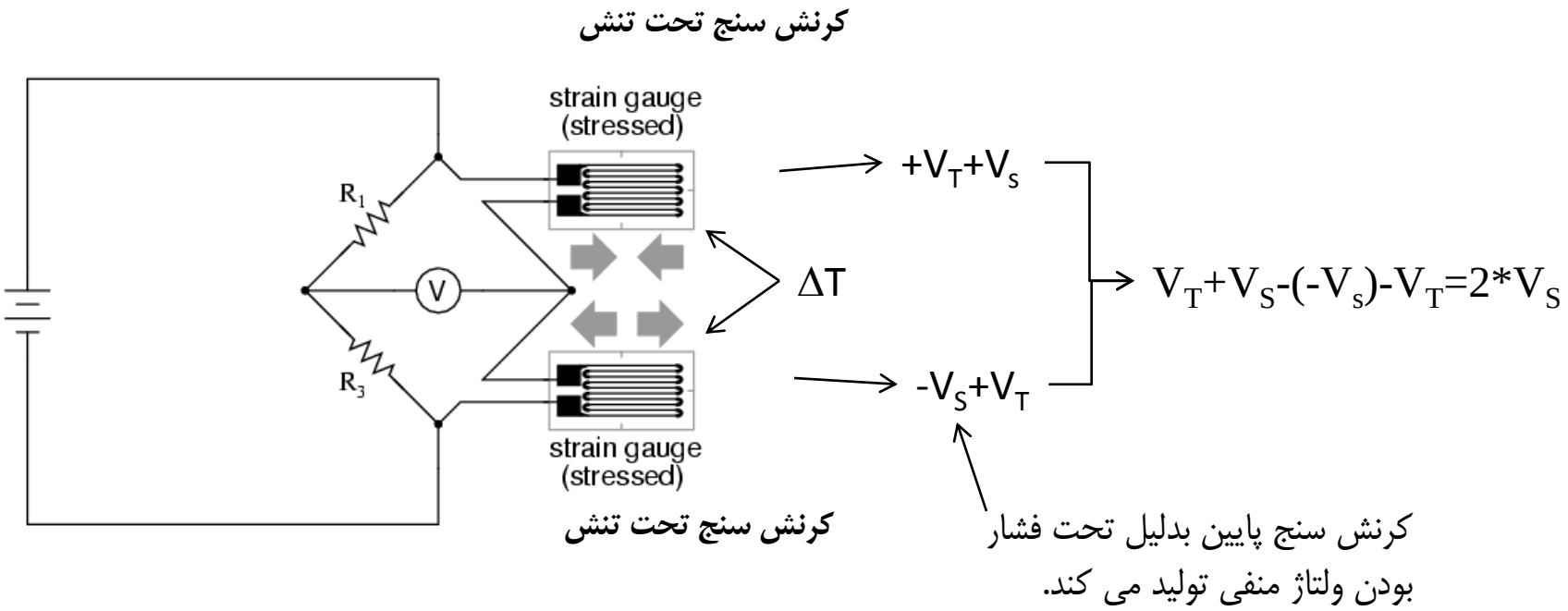


❖ نیم پل

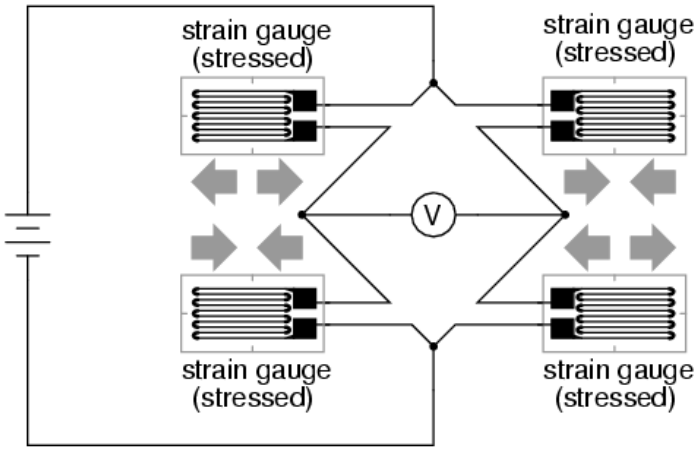
- دو کرنش سنج فعال وجود دارد.
- تنها برای خمش بکار می رود.
- تغییرات دما را جبران می کند.

نیروسنج

- **چگونه در کنار جبران دمایی، خروجی نیز تقویت می شود**
- از آنجاییکه کرنش سنج بالا و پایین در معرض کشش و فشار می باشند پس ولتاژ مختلف العلامتی تولید می کنند و از طرف دیگر براساس محاسبات پل وتسون ولتاژ های این دو شاخه از هم کسر می شود.

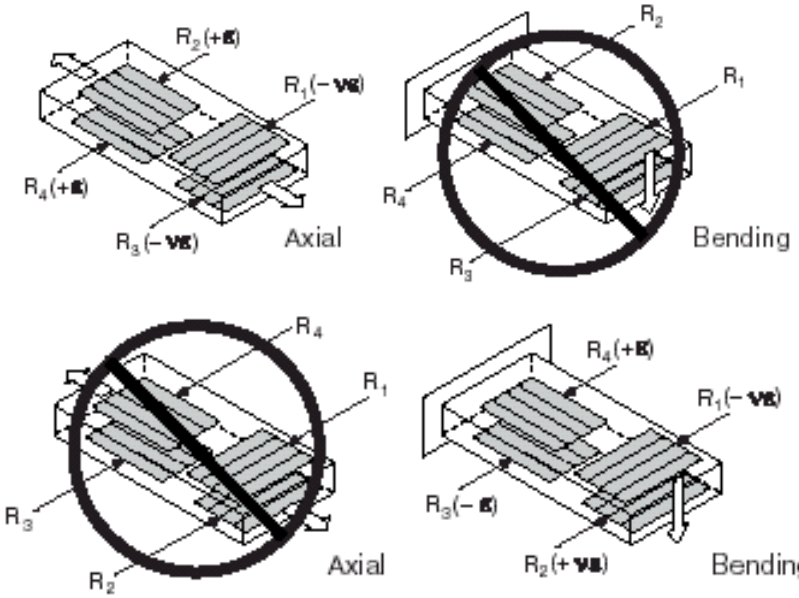


نیروسنج



❖ پل کامل

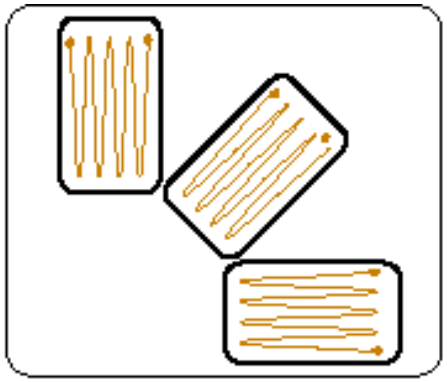
- چهار کرنش سنج فعال
- در دو طرف تیر تحت کشش یا خمش بسته می شوند.
- تغییرات دما را جبران می کند.
- تاثیر نسبت پواسون بر روی کرنش اصلی را جبران می کند.
- نسبت به موارد قبلی خروجی خطی دارد.



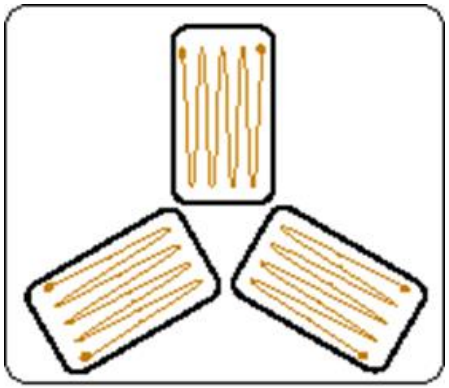
نیروسنج

❖ آرایش کرنش سنج ها (Rosette)

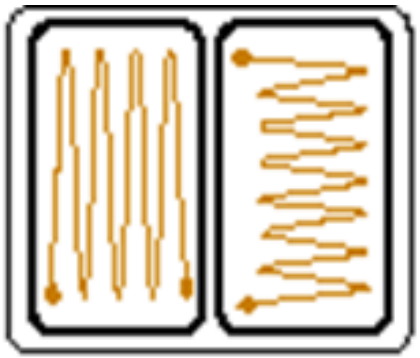
- برای محاسبه کرنش یا تنش در بیش از یک محور استفاده می شوند.
- انواع آرایش
  - آرایش T :برای بررسی تنش های اصلی زمانی که محور آنها مشخص باشد.
  - آرایش دلتا: برای بررسی تنش های اصلی هنگامی که محورهای اصلی مشخص نباشند.
  - آرایش مستطیلی: برای بررسی تنش های اصلی هنگامی که محورهای اصلی مشخص نباشند.



0°-45°-90° Retangular Rosette



0°-60°-120° Delta Rosette



0°-90° T Rosette

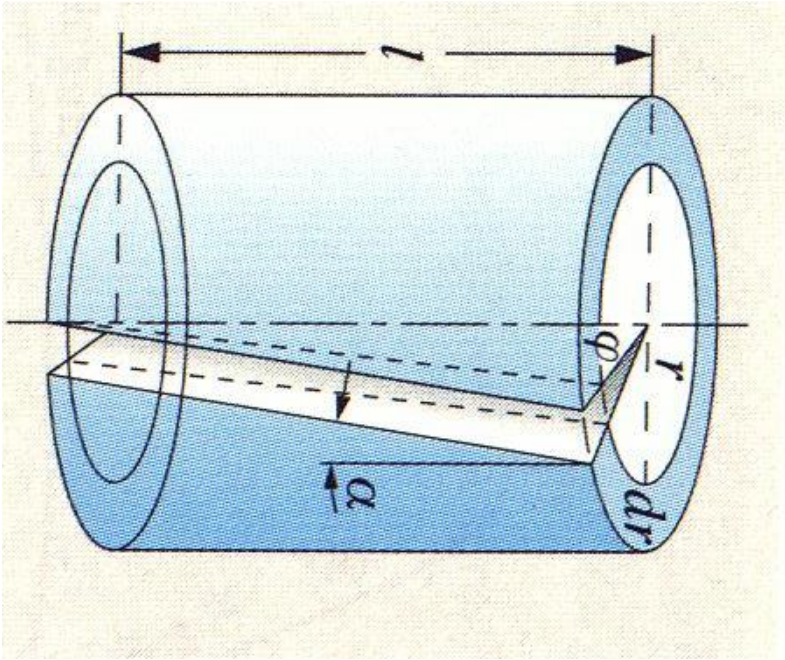
نیروسنج

- مواردی که می بایست در انتخاب کرنش سنج لحاظ کرد:
  - فاکتور گیج بالا باشد(ایجاد کم کرنش سبب تغییرات زیاد در مقاومت)
  - پایداری بالا، خطی بودن و پسماند کم
  - حساسیت کمتر به عوامل محیطی مثل دما
  - اندازه فیزیکی و جرم آن کم باشد
  - سطح اشغال شده کم باشد تا بتوان به کرنش نقطه ای نزدیک شد
  - مقاومت کرنش سنج کم ولی حساسیت به کرنش بالا باشد
  - رابطه بین تغییرات مقاومت و تغییرات کرنش خطی باشد

مبدل گشتاور – گشتاور سنج

- دو نوع اندازه‌گیر گشتاور شامل اندازه‌گیری گشتاور:

1. در روی یک محور ساکن
2. در روی یک محور دوّار



➢ **اصل حاکم بر اندازه گیری گشتاور:**

- بدست آوردن تغییر زاویه یک قسمت محور نسبت به قسمت دیگر

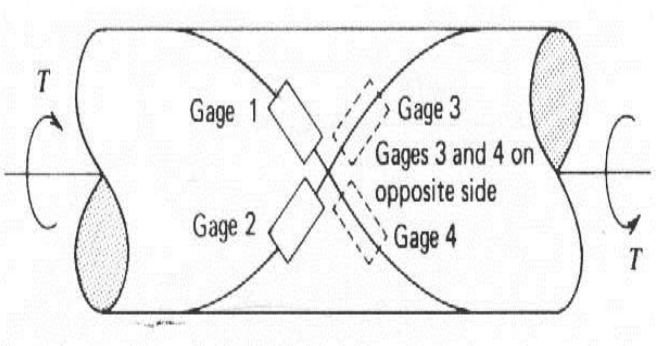
یا

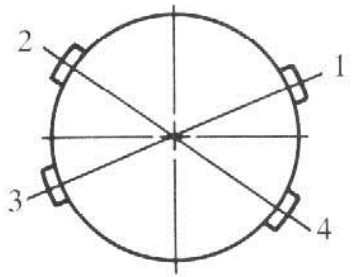
- بدست آوردن اختلاف کرنش دو قسمت محور

مبدل گشتاور – گشتاور سنج

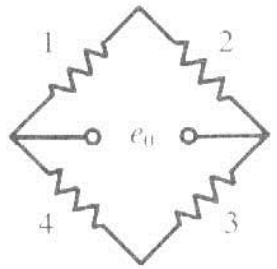
❖ اندازه‌گیری گشتاور در روی یک محور ثابت

- چهار کرنش‌سنج است که در امتداد دو مارپیچ ۴۵ درجهٔ عمود بر هم که به طور قطری در مقابل هم قرار گرفته‌اند نصب شده‌است
- کرنش‌سنج‌های شماره ۱ و ۳ که در مارپیچ طرف راست نصب شده‌اند کرنش مثبت و شماره‌های ۲ و ۴ که در مارپیچ طرف چپ قرار دارند کرنش منفی را دریافت می‌کنند.
- دو مارپیچ ۴۵ درجه، جهت‌های تنش و کرنش اصلی وارده بر میل‌گردی که در معرض نیروی پیچشی خالص قرار دارد نشان می‌دهند.





End view



Bridge circuit

گشتاور سنج

- **تنش برشی** (τ) در میل گرد

$$\tau_{xz} = \frac{TD}{2J} = \frac{16T}{\pi D^3}$$

- D قطر میل‌گرد و J ممان اینرسی قطبی میل‌گرد می باشد.
- تنش‌های عمودی در میل‌گردی که در معرض نیروی پیچشی خالص است $\sigma_y = \sigma_z = \sigma_x = 0$ برابر است با :
- $\sigma_1 = -\sigma_2 = \tau_{xz} = 16T/\pi D^3$
- **کرنش‌های اصلی**

$$\varepsilon_1 = \frac{16T}{\pi D^3}\left(\frac{1+\nu}{E}\right) \qquad \varepsilon_2 = -\frac{16T}{\pi D^3}\left(\frac{1+\nu}{E}\right)$$

- اگر این کرنش‌سنج‌ها به یک پل وتستون وصل شوند رابطهٔ بین ولتاژ خروجی (V_o) وگشتاور وارد شده (T)به صورت زیر خواهد بود:

- $\Delta R/R = S_g\, \varepsilon$
- $V_o = S_g\, \varepsilon\, V_i$

$$V_o = \frac{16T}{\pi D^3}\left(\frac{1+\nu}{E}\right) S_g Vi \rightarrow T = \frac{\pi D^3 E}{16(1+\nu) S_g V_i} V_o$$

گشتاور سنج

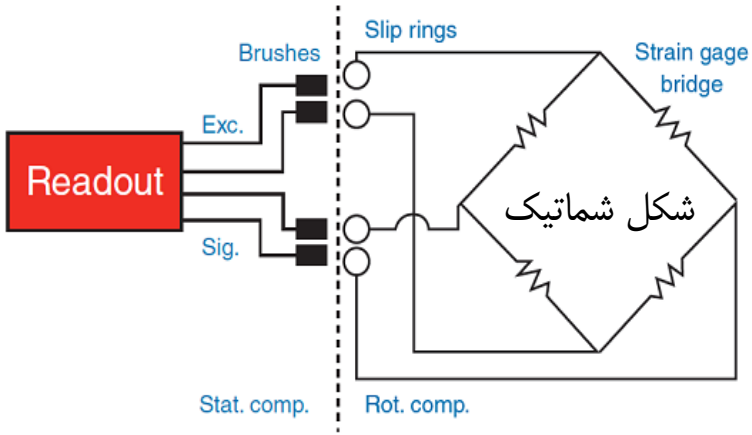
❖ **اندازه‌گیری گشتاور در روی یک محور دوّار**

- رینگ‌های لغزشی (Slip rings)
- دستگاه تله‌متری
- اپتیکی

گشتاور سنج

❖ انتقال سیگنال توسط رینگ‌های لغزشی

- برای انتقال ولتاژ کرنش سنج هایی که بصورت پل بر روی محور نصب شده اند، از رینگ های لغزان استفاده می شود که درحین دوران با زغال ها تماس می گیرند و سیگنال را انتقال می دهند.
- مشکل عمده در استفاده از رینگ لغزشی وجود اغتشاشات الکتریکی می باشد
- این پارازیت‌ها در ارتباط با رینگ‌ها و ذغال‌ها می‌باشد که با انتخاب آلیاژ مس – نیکل برای رینگ‌ها و مخلوط نقره – گرافیت برای ذغال‌ها مقدار آن به حد قابل قبول می‌رسد.

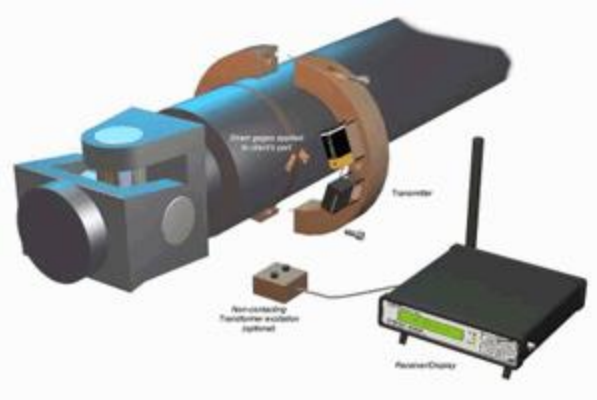


شکل شماتیک

گشتاور سنج

❖ انتقال سیگنال توسط تله‌متری

- در اکثر موارد انتهای محور دوّار جهت استفاده از رینگ لغزنده قابل دسترس نمی‌باشد. در این موارد از وسیلهٔ تله‌متری جهت انتقال سیگنال‌ها استفاده می‌شود.
- ولتاژ خروجی پل وتستون تبدیل به یک سیگنال رادیوئی می‌شود.



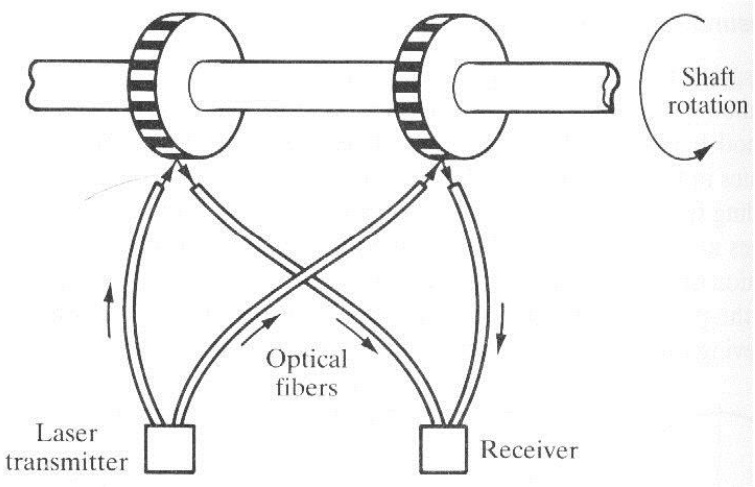
➢ اجزای دستگاه تله متری

- یک طوقهٔ دو قسمتی که روی محور دوّار نصب شده‌است.
- منبع قدرت
- مدولاتور سیگنال (Signal ,Modulator)
- یک اوسیلاتور کنترل شده با ولتاژ (Voltage Controlled Oscillator = VCO)
- یک آنتن

گشتاور سنج

❖ اندازه‌گیری گشتاور به روش اپتیکی

- دو چرخ که به طور عرضی دارای نوارهای سفید و سیاه هستند در روی یک محور نصب شده‌اند.
- در حالت عادی نوارهای سیاه و سفید در دو چرخ کاملاً در امتداد هم قرار دارند.
- دوران چرخ‌ها موجب ایجاد پالس‌هائی از انعکاس نور لیزری می‌گردد و این پالس‌ها به وسیلهٔ یک جفت کابل فیبری – اپتیکی دیگری به یک دریافت کننده منتقل می‌گردند.
- اندازه‌گیری اختلاف فاز پالس‌های دریافتی این امکان را می‌دهد که اندازهٔ گشتاور در محور محاسبه شود.



کالیبراسیون مبدل های نیرو و گشتاور

- تمامی ترانسدیوسرها باید بصورت دوره ای کالیبره شوند تا اطمینان حاصل شود که حساسّیت آنها در اثر گذشت زمان و یا استفاده نامطلوب تغییر نیافته باشد.

❖ روش بارگذاری تدریجی

- بار به صورت افزایشی و در محدوده‌ی کار مبدل وارد می‌شود. خروجی مبدل با باری که وارد می شود ثبت شده و اختلاف آنها یاداشت می‌گردد (خطاها).

➢ نتیجه ارزیابی:

- خطاها کم باشد← ضریب کالیبراسیون تعیین می شود.
- مقدار خطا زیاد باشد ولی ثابت بماند←ضریب کالیبراسیون تعیین می شود.
- خروجی مبدل غیرمنتظره و متغیر است←اگر بقیهٔ قسمتهای موجود در سیستم اندازه‌گیری درست کار کنند می‌توان نتیجه گرفت که مبدل مزبور معیوب بوده و نمی‌تواند کالیبره شود.

کالیبراسیون مبدل های نیرو و گشتاور

❖ استفاده از دو مبدل که به صورت سری بهم متصل می‌باشند

- این روش وقتی که ماشین تست جهت کالیبراسیون در دسترس نیست به کار می‌رود.
- نتایج مبدل مورد آزمون با مبدل مرجع مقایسه می شود.

❖ وزنه های کالیبراسیون

- برای کالیبره نمودن نیروسنج‌ها و یا گشتاورسنج‌های کوچک اکثراً از وزنه‌های معلوم و استاندارد به عنوان بار وارده استفاده می‌شود.
- معایب وزنه های استاندارد
  - وقتی ظرفیّت باری دستگاه از حدود ۱ کیلو نیوتن تجاوز نمود کالیبراسیون از این طریق عملاً ممکن نخواهد بود.
  - کالیبره نمودن با استفاده از وزنه‌های استاندارد بستگی به شتاب ثقل زمین دارد که در مناطق و ارتفاعات مختلف متفاوت است.